陸棚循環流に対する波-流れ相互作用の効果について Wave-current Interaction on Inner-shelf Circulations

 内山雄介¹,神戸大院工,神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail:uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp 甲斐田秀樹², 電中研,千葉県我孫子市我孫子 1646, E-mail: h-kaida@criepi.denken.or.jp Yusuke UCHIYAMA¹, Kobe University, 1-1 Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, Japan Hideki KAIDA², CRIEPI, 1646 Abiko, Abiko, Chiba, Japan

Effects of two-way wave-current interaction on the surfzone-inner shelf circulations are investigated by exploiting the ROMS-WEC model (Uchiyama *et al.*, 2010) coupled tightly with a spectrum-peak wave model to account for both wave effects on currents (WEC) and current effects on waves (CEW). Eddy activity around the outer edge of the surfzone is enhanced when CEW is considered. The key mechanism to induce the surfzone-inner shelf dynamical interaction and enhancement of offshore eddy activity is considered to be CEW that weakens the offshore component of the littoral currents. In turn, offshore eddy activity is attenuated by WEC, demonstrating that wave-current interaction plays an essential role not only in the sufzone but also in the shelf region.

1. はじめに

沿岸域における物質の移流拡散や漂砂現象などの海域環境や沿 岸防災上の各種課題の解決に向けて, 岸-沖間の海水・物質交換に 関する理解を深めることは極めて重要である. これに対して、近 年の海洋モデルの高精度化や観測技術の向上に伴い、陸棚上のメ ソスケール・サブメソスケール渦やそれらに付帯する循環流につ いての定量的な評価がなされつつある.一方で、沖合から岸へと 伝播する波浪は、一般に岸から数km~数10mの沖合海域におい て砕波し、波が保持していた運動量とエネルギーが平均流へと伝 達され、海浜流を生じることが知られている.陸棚上の循環流と 海浜流は空間的にオーバーラップしており、相互に影響を及ぼし 合っているにも関わらず、その力学的な構造に関する研究は立ち 遅れていた.通常、海洋物理学分野では砕波点近傍より岸側の領 域(砕波帯)は無視されることが多く、反対に、砕波帯を取り扱 う海岸工学分野では砕波帯外縁より沖側の沿岸海洋の影響を考慮 することはあまりない.したがって、両者をリンクさせ、砕波帯-陸棚間をシームレスに接合する解析フレームワークによってこの 問題にアプローチすることが本質的に重要となる.

岸近傍の流れは波浪の影響を強く受けるが、反対に、流れが存 在すれば波浪場もまた変形される.したがって、波・流れ共存場 においては、波浪から平均流への効果(Wave Effects on Currents: WEC)と、平均流から波浪場へのフィードバック効果(Current Effects on Waves: CEW)を双方向的に考慮する必要がある(例え ば、Uchiyama et al., 2009).平均流場を Primitive 方程式で表現し、 波の効果を考慮して Euler 的に位相平均操作を行うと、保存的な WEC として vortex force, Bernoulli head, Stokes-Coriolis force が、 非保存的な WEC として砕波や底面摩擦に伴う運動量輸送効果や



Figure 1 The idealized topography used in the present study.

鉛直混合効果が外力項として出現する(McWilliams et al., 2004, Uchiyama et al., 2010).他方,波浪場をWKB 近似に基づく位相平 均型の屈折方程式系で表現すると,流れに伴う CEW として,群 速度変化に伴う屈折効果や,分散関係式の改変による Doppler シ フトなどが新たな項として出現する.著者らのグループでは,こ れらの双方向的な WEC と CEW を統一的にカップリングし,3 次 元的に再現し,解析し得るモデルとして,領域海洋循環モデル ROMS(Shchepetkin and McWilliams, 2005)をベースにした ROMS-WEC モデルを開発している(Uchiyama et al., 2010).

ROMS-WEC モデルの適用例として、甲斐田・内山 (2014) は、 水深平均型の位相平均海浜流モデルを用いて離岸流場・沿岸流場 および両者間の遷移過程における非定常海浜流場に及ぼす CEW の影響について解析し、平均流および乱流場に対する CEW の効 果を定量的に評価した.また、内山ら (2013) は、5 段ネスティ ングによるダウンスケーリング海洋モデルにより、米国南カリフ ォルニア湾を対象とした synoptic なモデリングを行い、外洋影響、 陸棚循環流およびメソスケール・サブメソスケール渦、砕波帯お よび海浜流を同時に考慮した解析を行った.解析に用いた5 段目 のネスト領域は、開放性海岸における砕波帯を十分に解像可能な

Table 1 ocean model configuration

domain size	L_x (cross-shore) = L_y (alongshore) = 40,960 m	
number of grid cells	$512 \times 512 \times 24$ vertical layers (σ -coodinate)	
lateral resolution	$\Delta x = \Delta y = 80 \text{ m}$	
surface wind stress	$\tau_x = 0, \ \tau_y = 0.2 \sin(t \pi/2.5)$ (Pa)	
	t: time (day)	
temperature initial condition	$T(z) = 14.1 + 4 \tanh(0.105 z + 2)$	
salinity initial condition	$S(z) = 33.7 - 0.2 \tanh(0.1 z + 2)$	

 Table 2
 incident wave conditions at the offshore boundary

case #	description	$H_{rms}(\mathbf{m})$	$T_p(\mathbf{s})$	$\theta_p(^{\circ})$
1	baseline case (rip currents)	2.0	7.0	0
2	weak rip currents	1.0	7.0	0
3	longshore currents	2.0	7.0	10

Table 3 wave-current coupling patterns

coupling pattern name	WEC	CEW
WEC-only	yes	no
WEC+CEW	yes	yes
No-WEC	no	no



Figure 2 Snapshots of normalized relative vorticity on 31^{st} model day at surface, ζ/f , where f: Coriolis parameter and ζ : relative vorticity, for (a) – (c): the entire model domain and (d) – (f): brow-up near the shoreline. (a) and (d): WEC-only, (b) and (e): WEC+CEW, (c) and (f): No-WEC. The baseline incident wave condition (case 1) is imposed.

水平空間解像度 20 m の超高解像度モデルとなっており, 砕波の 影響によって汀線付近に発達する海浜流系(離岸流,沿岸流など) が砕波帯ー陸棚間の混合を3次元的に促進すること,水平物質分 散に対する砕波の効果は特に初期分散過程において顕著に現れる ことなど,砕波帯ー陸棚相互作用に対する WEC の効果を定量的 に明らかにした.しかしながら,この5段ネストモデルの波浪場 はスペクトル波浪モデル SWAN によって別途評価したものであ り,流動モデルに対しては一方向的に外力として与えていたため, CEW が考慮されていなかった.

そこで本研究では、陸棚循環流と海浜流が重畳する状況下において、WEC と CEW による双方向的な波-流れ相互作用を正確に 考慮し、解析を行うことを目的とする.具体的には、外力等の諸 条件を任意に制御することが可能な理想条件下において、波-流 れ相互作用を双方向的に考慮した3次元数値実験を行い、砕波帯 周辺における非定常海浜流と陸棚上で発達する循環流およびサブ メソスケール渦がオーバーラップする状況を表現し、波-流れ相 互作用が沖合流動および砕波帯-陸棚間の力学的な相互作用に及 ぼす影響についての基礎的な検討を行った.

2. 解析モデル

領域海洋循環モデル ROMS (Shchepetkin and McWilliams, 2005) に vortex-force 型 Euler 位相平均 Primitive 方程式を組み込むことで、 波浪により駆動される(位相平均された)3 次元流れの解析を可 能にした ROMS-WEC (Uchiyama *et al.*, 2010) とスペクトルピーク 型 WKB 波浪モデル (Mei, 1994) をタイトにカップリングさせ ることによって波一流れ共存場を表現した.米国サンタモニカ湾 の一部を模したモデル地形 (Fig. 1) を作成し、同図のように岸沖 方向に x 軸、沿岸方向に y 軸、鉛直上方に z 軸を定め、沖側境界 における波の入射角 $\theta_p & x$ 軸から時計周りの方向に定義した.本 モデルでは、波浪や海上風、初期成層および地形等の諸条件を任 意に制御することが可能であるが、今回は Table 1 に示す条件を 適用した. 同海域における冬季の典型的な密度成層を初期条件として与え,周期的に変化する沿岸方向の海上風応力を作用させて 湧昇を励起させ,密度フロントにおける傾圧不安定によるサブメ ソスケール inner shelf eddy を発達させた.同時に,異なる波浪場 とそれに伴って生じる様々な regime の海浜流場における解析を 行うべく, Table 2 に記した 3 パターンの入射波条件を課した.ま た,波浪場一位相平均流場間のカップリング条件は Table 3 に示す 3 パターンを考慮した.すなわち,平均流に対する波の効果を一 切無視した No-WEC (通常の ROMS),WEC を一方向的に考慮し た WEC-only,WEC と CEW を双方向的にカップリングさせた WEC+CEW である.本研究では,Table 2 の入射波条件と,Table 3 のカップリング条件を組み合わせた計 7 ケースについて,それ ぞれ実時間で60 日分の数値積分を行い,解析に供した.本稿では このうち直入射条件(case 1)の結果について示すこととする.

3. サブメソスケール渦に対する波-流れ相互作用の影響

ベースラインケースである直入射条件(case 1: Table 2)におけ る表層無次元渦度 ζ/f のスナップショットを Fig. 2 に示す.まず, 計算領域全体の表層渦度場を示す Fig. 2 a-c を見ると,WEC を考 慮しないケースでは他ケースよりも細かく強いサブメソスケール 渦が沖合へ広く発達しており、WEC の効果によって沖合でのサ ブメソスケール渦の発達が抑制されることが分かる.このWEC によるサブメソスケール渦の発達抑制効果は,沖合の海洋表層に おける無次元渦度 ζ/f 二乗平方根 (χ)の空間積分値(例えば, Dong and McWilliams, 2007)の時系列(Fig. 3)からも明らかであ り、WEC-only ケースの χ (黒太線)はWEC なしケース(赤破線 および青実線)と比べて半分程度の値しか取らない.この原因と して、WEC を考慮することによりストークスコリオリ項,vortex force 項が出現することに伴い,運動量収支構造が大幅に変化した ことが原因である考えられる.つまり,内山ら(2012)が報告し ているように、WEC を考慮すると表層混合層厚の薄化や鉛直混



Figure 3 Time series of the square root of the area-integrated surface normalized relative vorticity squared (enstrophy, χ). To exclude the surf-zone effects, the area integral is taken for x > 10 km.



Figure 4 Cross-shore profile of the alongshore-averaged instantaneous enstrophy χ on the model day 31 while the difference of enstrophy for the WEC-only case from that for the WEC + CEW case is depicted.

合の抑制が生じ、沖合海域における成層構造や流動が改変される ことを示していると解釈される.

次に,離岸流とサブメソスケール渦による砕波帯–陸棚間の相互 作用をζ/fのスナップショットにより検討する(Fig.2 d-f).WEC を考慮しないケースでは,沖合海域からサブメソスケール渦が砕 波帯を超えて岸直近まで侵入している様子が見て取れる(Fig.2 f). 一方,WECのみを考慮したケースでは(Fig.2 d),砕波帯周辺に 規則的に発達した離岸流セルに伴う渦度構造が卓越し,サブメソ スケール渦の岸側への侵入がブロックされている.CEWを考慮 したケースでは(Fig.2 e),サブメソスケール渦と離岸流の間に顕 著な相互干渉が生じて,離岸流セル構造が沿岸方向に大きく変動 していることが分かる.これは非定常な循環流に応答するCEW の効果による波浪場の変動に加え,CEWによる砕波帯内におけ る離岸流の発達抑制効果(例えば,甲斐田・内山,2014)によっ て離岸流の沖合への噴出が弱化し,相対的にサブメソスケール渦 の砕内帯内への侵入と干渉が容易になった結果を表しているもの と考えられる.

ケース間の差を定量的に把握するため、 χ の沿岸平均値の岸沖 分布(瞬間値)をWEC ありのケース、WEC とCEW の双方を考 慮したケースに対して求め、その差を図化したところ、CEW に よる渦度の強化を意味する負のピークが砕波帯のすぐ沖側(x =0.9 – 2.0 km 程度の範囲)に出現することが確認された(Fig. 4). このような双方向的な波-流れ相互作用の効果は、砕波帯・陸棚お よび両者の境界における流況・力学構造のみならず、沖合に対す る境界条件の改変を通じ、沖合流動に対しても少なからぬ影響を 与えている可能性がある.

4. おわりに

本研究では、沿岸方向に周期性を持つサンタモニカ湾を模した 砕波帯を有するモデル地形を考え、初期成層と時間変動する風応 力を与えることにより非定常な沿岸湧昇・沈降を生じさせ、湧昇 フロント近傍の傾圧不安定によって発生するサブメソスケール渦 と、砕波帯周辺に発生する非定常な海浜流系を同時に考慮した数 値実験を実施した.沖合海域では、サブメソスケール渦の強度抑 制、鉛直混合の抑制等の形でWECの効果が現れた.砕波帯・陸棚 相互作用に対する波-流れ相互作用の効果は劇的であり、その影響 は砕波帯・陸棚に留まらず、岸側境界条件の改変を通じて沖合へ も波及する可能性が示唆された.

謝辞

本研究は、科学研究費基盤研究 C (24560622,研究代表者:内山 雄介)および(独)科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業 「黒潮と内部波が影響する沿岸域における生物多様性および生物 群集のマルチスケール変動に関する評価・予測技術の創出(研究 代表者:山崎秀勝・東京海洋大学教授)」の援助を受けた。

参考文献

- 内山雄介・西井達也・James C. McWilliams (2012) : VF 型位 相平均 Primitive 方程式を用いた沿岸海洋流動に及ぼす波浪 の影響に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_426-I_430.
- (2) 内山雄介・甲斐田秀樹・James C. McWilliams (2013) : VF型 位相平均 Primitive 方程式による砕波帯一陸棚相互作用に関 する研究,土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I 56-I 60.
- (3) 甲斐田秀樹・内山雄介 (2014): 波一流れ相互作用が海浜流系の力学構造に及ぼす影響について、土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No. 1, pp. 1–14.
- (4) Dong, C. and J. C. McWilliams (2007): A numerical study of island wakes in the Southern California Bight, *Continental Shelf Res.*, Vol.27, pp.1233-1248.
- (5) McWilliams, J.C., J.M. Restrepo, and E.M. Lane (2004): An asymptotic theory for the interaction of waves and currents in coastal waters, *J. Fluid Mech.*, Vol. 511, pp.135-178
- (6) Mei, C. C. (1994) : The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, World Scientific, Singapore, 740p.
- (7) Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams (2005) : The Regional Oceanic Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates oceanic model, *Ocean Modell.*, Vol.9, pp.347-404.
- (8) Uchiyama, Y., McWilliams, J. C. and Restrepo, J. M. (2009) : Wave-current interaction in nearshore shear instability analyzed with a vortex-force formalism, *J. Geophys. Res.*, Vol.114, C06021, doi:10.1029/2008JC005135, 2009.
- (9) Uchiyama, Y., J. C. McWilliams and A. F. Shchepetkin (2010): Wave-current interaction in an oceanic circulation model with a vortex force formalism: Application to the surf zone, *Ocean Modell.*, Vol. 34: 1-2, pp.16-35.